

УДК 681.513.6:622.243

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ І КОНТРОЛЬ КООРДИНАТНИХ ЗБУРЕНЬ
У ПРОЦЕСІ ПОГЛИБЛЕННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН****Н.В. Сабат, А.І. Лагойда, О.В. Гутак**ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46067,
e-mail: kafatp@ukr.net

Роботу присвячено розробці методу ідентифікації та автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин, що дає змогу контролювати координатні збурення незалежно від типорозмірів породоруйнівного інструменту та геолого-технологічних умов і вносити корективи в керувальні дії процесу буріння. На базі аналізу розподілу показника буримості і похибок контролю визначено ймовірність хибної тривоги, невизначеної відмови та вірогідність контролю, що дало змогу обґрунтувати спосіб визначення порогового значення буримості гірських порід для системи автоматизованого контролю. Як ознака зміни буримості використана поява спостереження з рівнем шуму, що перевищує заданий поріг. Встановлено зв'язки систематичної і випадкової похибок контролю з показником буримості гірських порід, що дало змогу використати його для вирішення задач оптимізації керування процесом буріння.

Ключові слова: автоматизований контроль, математичне моделювання, ідентифікація, координатне збурення, буримість, буріння.

Работа посвящена разработке метода идентификации и автоматизированного бесконтактного контроля буримости горных пород в процессе углубления скважин, что позволяет контролировать координатные возмущения независимо от типоразмеров породоразрушающего инструмента и геолого-технологических условий и вносить коррективы в управляющие воздействия процесса бурения. На базе анализа распределения показателя буримости и погрешностей контроля определены вероятность ложной тревоги, неопределенной отказа и достоверность контроля, что позволило обосновать способ определения порогового значения буримости горных пород для системы автоматизированного контроля. Как признак изменения буримости использована появление наблюдения с уровнем шума, превышающего заданный порог. Установлено связи систематической и случайной погрешностей контроля с показателем буримости горных пород, что позволило использовать его для решения задач оптимизации управления процессом бурения.

Ключевые слова: автоматизированный контроль, математическое моделирование, идентификация, координатное возмущение, буримость, бурение.

Report is devoted to development of method of authentication and automated noncontact control of drillability of mountain breeds in the process of deepening of oil and gas mining holes, that allows to control coordinate indignations (drillability of breed) regardless of dimension-types of drilling instrument and geotechnological terms and to amend in the control action of process of the boring drilling.

On the base of analysis of distributing of drillability index and control errors, probability of erroneous alarm, probability of indefinite refuse and control authenticity were determined, that enabled to ground the method of determination of threshold value of drillability of mountain breeds for the automated checking system. As a sign of change of drillability it was used appearance of supervision with the level of noise which exceeds set breeds. The copulas of systematic and casual control errors with the index of drillability of mountain breeds are set, that allowed to use it for the decision of tasks of optimization of process of the boring drilling control.

A structure, algorithmic and programmatic providing of device of the automated noncontact control of drillability of mountain breeds, is offered, that enabled to integrate him in existent control system by a process boring drilling of SKUB-M2.

Keywords: automated control, mathematical design, authentication, coordinate indignation, drillability, boring drilling.

Ідентифікація і контроль координатних збурень, що діють на систему автоматичного керування процесом поглиблення нафтових і газових свердловин, є актуальним науково-практичним завданням у зв'язку з інтенсивним впровадженням у галузі комп'ютерно-інтегрованих технологій [1,2].

Проте, аналіз літературних джерел [1-3 та ін.] свідчить про недостатній об'єм проведених досліджень у напрямку ідентифікації і контролю координатних збурень в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин, зокрема, буримості гірських порід.

Тому метою даної роботи є у розробленні методу ідентифікації та автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських по-

рід у процесі поглиблення нафтових і газових свердловин.

Розглянуто задачу, яка повинна розв'язуватися системою автоматизованого контролю на основі експериментальних даних про механічну швидкість буріння $v_t^{(i)}$: визначити параметри моделі v_t , тобто початкову механічну швидкість v_0 і величину L , яка входить до структури залежності $\varphi(L, t)$ – функції зношування долота.

Параметр L визначається значенням показника m у рівнянні [3]:

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = -K_v v_0^{m-1} \varphi^m(t), \quad (1)$$

Таблиця 1 – Значення функцій $y(L, t_i)$ та $\gamma(L, t_i)$ для різних значень m

m	$\varphi(L, t_i)$	L	$\gamma(L, t_i) = \partial\varphi(L, t_i)/\partial L$
0	$1 - K_R t_i$	K_R	$-t_i$
1	$e^{-K_v t_i}$	K_v	$t_i e^{-K_v t_i}$
2	$\frac{1}{1 + K_\varepsilon t_i}$	K_ε	$-\frac{t_i}{(1 + K_\varepsilon t_i)^2}$
3	$\frac{1}{\sqrt{1 + K_q t_i}}$	K_q	$\frac{t_i}{2\sqrt{1 + K_q t_i}}$

де: K_v – коефіцієнт, який характеризує інтенсивність зношення долота і залежить від абразивних властивостей породи,

m – ціле додатне число, яке належить множині N : $N = \{0, 1, 2, 3\}$.

Рівняння (1) дало змогу визначити функцію зношення долота $\varphi(t)$ за різних значень m і початкової умові $\varphi(0) = 1$, а також множини

$L \in \{K_R, K_v, K_\varepsilon, K_q\}$, де $K_R = \frac{K_v}{v_0}$, $K_\varepsilon = v_0 K_v$,

$K_q = 2K_v v_0^2$.

Параметри моделі $\hat{v}_t = v_0 \varphi(L, t)$ визначали МНК-методом, тобто мінімізували функціонал:

$$J(v_0, L) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (v(t_i) - v_0 \varphi(L, t_i))^2. \quad (2)$$

Із першої умови мінімуму функціоналу (2) $\frac{\partial J(v_0, L)}{\partial v_0} = 0$ та другої умови $\frac{\partial J(v_0, L)}{\partial L} = 0$ з

урахуванням позначення $\gamma(L, t_i) = \frac{\partial \varphi(L, t_i)}{\partial L}$ отримано рівняння:

$$\sum_{i=1}^N (v(t_i) \gamma(L, t_i) - v_0 \varphi(L, t_i) \gamma(L, t_i)) = 0. \quad (3)$$

Значення функцій $\varphi(L, t_i)$ і $\gamma(L, t_i)$ для різних значень m наведені у табл. 1.

Крім моделі $v_t = v_0 \varphi(t)$ були досліджені моделі $v_t = a_0 + a_1 t$, $v_t = v_0 t^\beta$ і $v_t = a_0 + a_1 \ln t$. Другу нелінійну модель привели до лінійної, прологарифмувавши ліву і праву її частини: $\ln v(t_i) = \ln v_0 + \beta \ln(t_i)$.

Ввівши нові змінні $y_i = \ln v(t_i)$, $x_i = \ln(t_i)$, $\alpha = \ln v_0$, було отримано модель $y_i = \alpha + \beta x_i$, яка лінійна відносно параметрів α і β . До вказаних моделей застосовано МНК-метод й отримано рівняння

$$\bar{a} = CF^T \bar{Y}, \quad (4)$$

де: \bar{a} – вектор параметрів моделі;

$C = (F^T F)^{-1}$ – дисперсійна матриця;

\bar{Y} – вектор вихідних величин.

Одержано результати порівнянь математичних моделей механічної швидкості проходки за допомогою ЕОМ. Критерієм адекватності прийнято значення дисперсії адекватності

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - h_i)^2, \quad (5)$$

де: H_i – експериментальні значення проходки долота;

h_i – обчислені значення проходки, $i = \overline{1, N}$;

N – кількість експериментальних точок.

Що стосується залежності початкової механічної швидкості буріння v_0 від керувальних дій F і n , то, оскільки, апіорі відомо, що ця залежність має нелінійний характер, тому для математичного опису цих залежностей запропоновано використати багатовимірну нелінійну апроксимацію, яка має вигляд многочлена:

$$y = \sum_{i=1}^k a_i \prod_{j=1}^R U_i^{q_{js}}, \quad (6)$$

де: U_i – керувальні впливи;

a_i – коефіцієнти полінома (параметри моделі);

q_{js} – невід'ємні цілі числа, які обмежені величинами Q_i ; $0 \leq q_{js} \leq Q_i$;

R – кількість керувальних впливів, та обмежитися вибором квадратичної функції

$$v_0(F, n) = a_0 + a_1 F + a_2 n + a_3 F^2 + a_4 n^2 + a_5 F n, \quad (7)$$

для ідентифікації параметрів якої використано МНК-метод.

Для вирішення задачі розбиття гірських порід на пачки як критерій запропоновано параметр L функціональної залежності $v_t = v_0 \varphi(L, t)$. Отримані результати досліджень дали змогу визначити критерій $L_i \in \{K_R, K_v, K_\varepsilon, K_q\}$ (табл. 2), який харак-

Таблиця 2 – Значення критерію L_i виявлення меж пластів

m	Оцінка стану озброєння долота	Значення критерію L_i
0	$\xi = \frac{v_t}{v_0}$	$K_{R_i} = \frac{1}{t_i} \left(1 - \frac{v_i}{v_0} \right)$
1	$\theta = \frac{v_0}{v_t}$	$K_{v_i} = \frac{1}{t_i} \ln \frac{v_0}{v_i}$
2	$\varepsilon = \frac{v_0}{v_t}$	$K_{\varepsilon_i} = \frac{1}{t_i} \left(\frac{v_0}{v_i} - 1 \right)$
3	$\zeta = \frac{v_0}{v_t}$	$K_{q_i} = \frac{1}{t_i} \left(\left(\frac{v_0}{v_i} \right)^2 - 1 \right)$

теризує сукупні фізико-механічні властивості гірської породи.

Показано, що при переході долота із одного пласта в інший показник L_i стрибкоподібно змінює своє значення і процес обчислення значення L_i генерує послідовність дискретних величин

$$L_i = \bar{L} + v_L,$$

де: \bar{L} – математичне сподівання величини L_i ;

v_L – перешкода, викликана з однієї сторони інструментальними похибками вимірювань, а з іншої – зміною властивостей породи всередині пласта.

Оскільки значення \bar{L} спотворено перешкодою, то стрибок \bar{L} , що відповідає моментові переходу долота через пласт, буде маскуватися цією перешкодою.

Зроблено припущення, що до моменту зміни пластів відомі статистичні характеристики перешкоди v_L , а після переходу долота в інший пласт стаціонарність перешкоди v_L не змінилась. Розглянуто задачу: на основі спостережень за величиною L_i при постійних режимних параметрах необхідно виявити момент переходу долота в інший пласт. Для її розв'язання запропоновано метод визначення меж гірських порід у процесі буріння, суть якого полягає у наступному. На основі спостережень за випадковим дискретним процесом L_i формується функція

$$g_i = \frac{1}{\sigma_L^2} (L_i - \bar{L})^2, \quad (8)$$

де $\sigma_L^2 = M[(L_i - \bar{L})^2]$ – дисперсія адитивної перешкоди v_L .

До моменту зміни пласта $\sigma_L = \sigma_L^{(1)}$, $L_i = L_i^{(1)}$, $\bar{L} = \bar{L}^{(1)}$ і послідовність g_i на кожному кроці спостережень співпадає з

$$\text{послідовністю } \left\{ \frac{1}{\sigma_L^{(1)2}} v_{L_i}^{(1)} \right\}, \quad \text{де}$$

$$v_L^{(1)} = L_i^{(1)} - \bar{L}^{(1)}. \text{ Тому } M[g_i] = 1.$$

Якщо в дискретний момент часу i_0 відбувся перехід долота із одного пласта в інший, тоді рівняння (9) з врахуванням того, що $L_i = \bar{L}^{(2)} + v_L^{(2)}$, набуде такого вигляду:

$$g_i = \frac{1}{\sigma_L^{(2)2}} (\Delta \bar{L} + v_{L_i}^{(2)})^2, \quad (9)$$

де: $\Delta \bar{L} = \bar{L}_i^{(2)} - \bar{L}^{(1)}$, $\sigma_L^{(2)2} = M(L_i - \bar{L}^{(2)})^2$.

Оцінка математичного сподівання випадкової послідовності (9) буде

$$M[g_i] = (\Delta \bar{L}^2 + \sigma_L^{(2)2}) / \sigma_L^{(2)2}, \text{ при } i > i_0. \quad (10)$$

Центруючи послідовність g_i , матимемо $M[g_i - 1] = 0$ при $i < i_0$ і коли $i > i_0$ математичне сподівання послідовності g_i буде визначатись за формулою (10).

На кожному кроці спостережень разом з дискретною послідовністю g_i запропоновано обчислювати функцію

$$G_i = \sum_{R=1}^i \frac{g_R - 1}{\sqrt{2i}}. \quad (11)$$

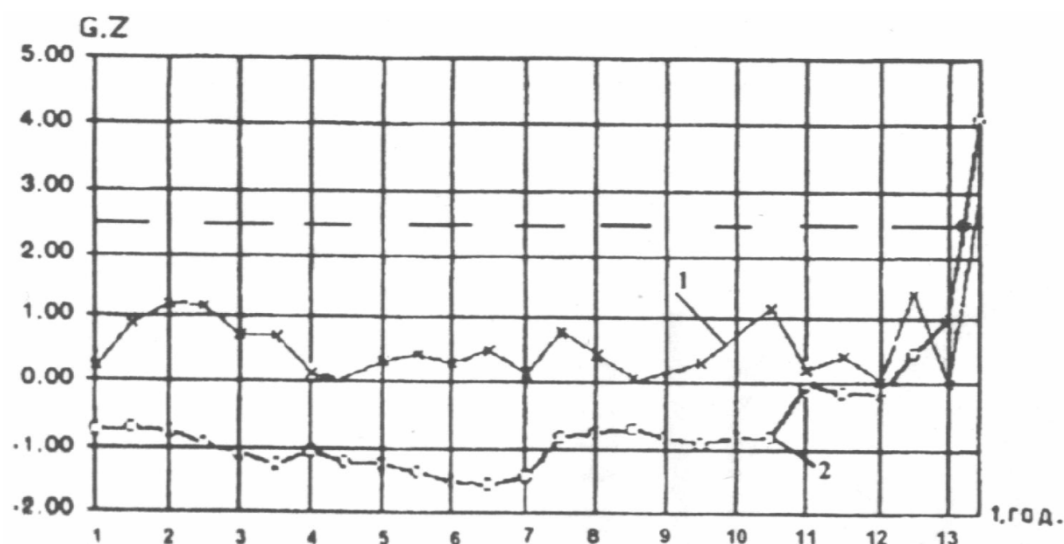
Оскільки $M[G_i] = \frac{1}{\sqrt{2i}} \sum_{R=1}^i M[g_R - 1] = 0$, то

до моменту дискретного часу, поки долото не перейшло в інший пласт математичне сподівання функції G_i дорівнює нулю. Показано, що після того, як долото перейшло в наступний

$$\text{пласт } M[G_i] = \frac{S_M(i - i_0 - 1)}{\sqrt{2i}}, \quad \text{де}$$

$$S_M = \frac{\Delta \bar{L}^2}{\sigma_L^{(1)2}} + \frac{\sigma_L^{(2)2}}{\sigma_L^{(1)2}} - 1.$$

Таким чином, до моменту переходу долотом меж пластів значення функції G_i коливається біля середнього значення, після того як долото перейшло в інший пласт ($i > i_0$) послідовність $|G_i|$ у середньому зростає з плином часу. Враховуючи цю властивість функції G_i , для виявлення моменту часу i_0 переходу долота в інший пласт використано процедуру порівняння значення G_i у кожний момент часу з певним порогом Δg . За оцінку значення i_0 береться ве-



1 – G-функція; 2 – Z-алгоритм
(бурова «Спас-101»; $H = 2823\text{--}2865\text{ м}$; $F = 176,4\text{ кН}$; $n = 1\text{ с}^{-1}$)

Рисунок 1 – Графіки зміни в часі G-функції і Z-алгоритму

личина, для якої виконується умова $|G_i| \geq \Delta g$, де $\Delta g = 2,5$.

Показано, що для зменшення похибки оцінки моменту часу переходу долотом межі двох пластів доцільно спільне використання функції G_i та так званого Z-алгоритму, основними параметрами якого є числа N , α і c , які повинні задовольняти наступним умовам:

$N \geq N_0 = [1/\alpha]$, $0 < \alpha < 0,5$, $0,5 < c < 1$, де $[1/\alpha]$ – ціла частина числа $1/\alpha$. На кожному кроці спостережень за випадковою величиною L_i запропоновано обчислювати функцію

$$Z(m, N) = \left| \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L_i - \frac{1}{N-m} \sum_{i=m+1}^N L_i \right|, \quad (12)$$

для якої правило виявлення меж пластів має наступний вигляд:

$$d_N(i_0) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \hat{m}/N > c \\ 0, & \text{якщо } \hat{m}/N \leq c \end{cases}, \quad (13)$$

де $\hat{m} = i_0$ – оцінка моменту переходу долотом межі двох пластів.

Запропоновано процедуру визначення моменту i_0 за Z-алгоритмом.

Даний алгоритм було перевірено під час визначення моменту зміни пласта гірських порід для бурової «Спас-101» Долинського УБР на глибині 2823–2865 м. Для цього вибирали наступні параметри алгоритму: $N = 62$; $\alpha = 0,2$, $\Delta = 0,55$, то $[\alpha N] = 12$ і $N - [\alpha N] = 50$, тобто $m = 11, 12, \dots, 50$, графік функції $Z(m, N)$ приведений на рис. 2, з якого випливає, що $m(n) = 38$ і функція $Z(m, N)$ досягає максимуму. Обчислюємо $m/N = 38/62 = 0,61$. Так як $m/N > c$, то оголошується тривога $d_N = 1$. Для здійснення перевірки Z-алгоритму використовується G-алгоритм, графік якого наведено на рис. 1. Для реалізації даних алгоритмів розроблена функціональна структура мікропроцесорного пристрою, який інтегрований в систему СКУБ-М2 (рис. 2).

Запропоновано здійснювати розбиття гірської породи на класи за буримістю на базі нейронної мережі зустрічного поширення, яка включає в себе вхідний шар і шари нейронів Кохонена та Гроссберга.

Навчання мережі здійснювали за допомогою імітаційного моделювання. Початкова швидкість буріння v_0 моделювалась наступним чином:

$$v_0 = \hat{v}_0 + v_t, \quad (14)$$

де v_t – адитивна перешкода з нульовим математичним сподіванням.

Для встановлення виду функції густини розподілу використані дані, які отримані при бурінні свердловини Прутець 1; тип долота ТКЗ-190,5; глибина 4118 м; спосіб буріння – роторний. Параметри режиму буріння: осьова сила на долото: 160,3 кН; частота обертання долота: $1,08\text{ с}^{-1}$. За результатами буріння побудовано графік проходки $h(t)$ (рис. 3), з якого видно, що за час буріння, який складає 0,37 год., зношення долота було незначним. Тому початкову швидкість буріння обчислювали за формулою

$$v_0^{(i)} = \frac{h(t_i) - h(t_i - \Delta t_i)}{\Delta t_i}, \quad (15)$$

де $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, $i = 2, 3, \dots, n$; n – кількість відліків проходки $h(t_i)$ на інтервалі часу $[0; t_n]$.

Відповідним чином визначалась і адитивна

перешкода $v_i = v_0^{(i)} - \hat{v}_0$, де $\hat{v}_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_0^{(i)}$.

Графік залежності $v_i(t)$ наведено на рис. 4. Використовуючи отримані дані, була побудована гістограма випадкової величини v_i , а для перевірки гіпотези про відповідність експериментальних даних нормальному закону розподілу був використаний χ^2 -критерій. Обчислене значення χ^2 є таким: $\chi^2 = 7,69$. Знаючи закон



Рисунок 2 – Функціональна схема пристрою визначення зміни меж пластів

розподілу випадкової величини v і його параметри, генерували випадкову послідовність \tilde{v}_0 . Значення \tilde{v}_0 вибирали із масиву $\tilde{v}_0 \in \{2,6; 3,7; 4,9; 7,1; 10,2\}$.

Було вибрано 5 класів. Мережа навчалась на об'ємі вибірки, який дорівнював 250. Класифікація згенерованих векторів здійснювалась за допомогою LVQ-мережі, кількість нейронів якої обчислювалась за формулою:

$$L = \frac{L_w}{n + m}, \quad (16)$$

де L_w – число синоптичних ваг у нейромережі, яке визначено згідно наступної формули:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \left(\frac{N}{m} + 1 \right) (n + m + 1) + m, \quad (17)$$

де: n, m – відповідно розмірності вхідного і вихідного сигналів;

N – число елементів навчальної вибірки.

Проведено тестування мережі, яке показало, що після навчання мережа правильно виконала класифікацію (рис. 5, а). Як приклад на (рис. 5, б) наведено результат класифікації век-

тора $\tilde{v}_0(t)$ зі значенням $\tilde{v}_0 = 3,7$ м/год і $\sigma_v = 0,98$. Видно, що мережа віднесла його до другого класу.

Визначено ймовірність правильної класифікації властивостей гірських порід за буримістю за допомогою імітаційного експерименту. Були взяті значення \tilde{v}_0 , які наведені у табл. 3.

Проведено 100 імітаційних експериментів для кожного із п'яти значень \tilde{v}_0 . Значення ймовірності віднесення вектора $\tilde{v}_0 = \tilde{v}_0 + \bar{v}$ до певного класу зведені у табл.3. Показано, що нейронна мережа зустрічного поширення дала змогу з ймовірністю 0,92 здійснювати правильну класифікацію порід за початковою швидкістю буріння навіть при високому рівні шумів.

Для прогнозування середнього значення механічної швидкості буріння на тлі високочастотних завад з допустимим рівнем помилки запропоновано використати штучну нейронну мережу у вигляді лінійної тришарової мережі і реалізувати її на базі програмної системи Neural Analyzer 3.0. Як «навчальну множину» нейронної мережі використані експериментальні дані.

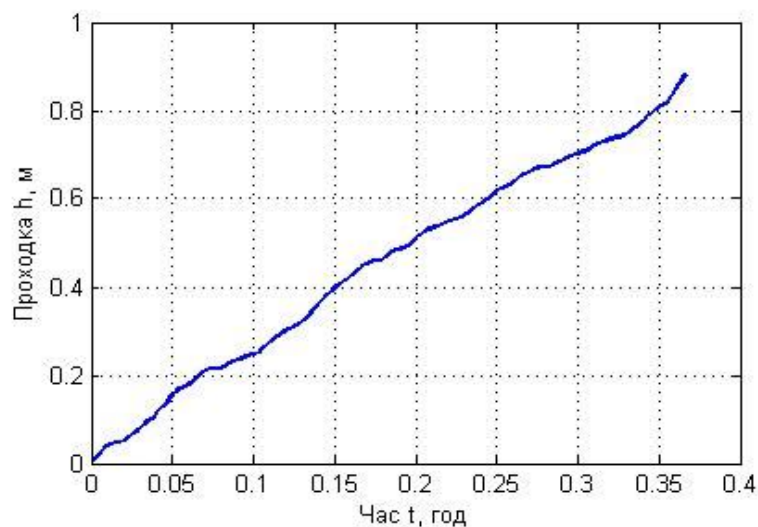


Рисунок 3 – Зміна у часі t проходки h

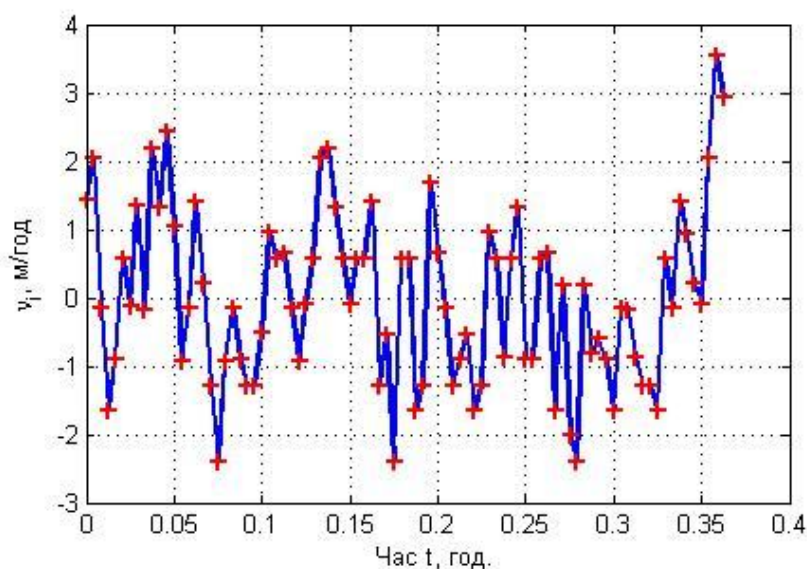


Рисунок 4 – Зміна у часі t механічної швидкості буріння v_t

$$\begin{array}{ccccc}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 Y=0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 & a) & & & b)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccccc}
 Y=0 & 1 & 0 & 0 & 0
 \end{array}$$

Рисунок 5 – Результат тестування мережі (а) і віднесення вектора $\tilde{v}_0(t)$ до певного класу (б)

Таблиця 3 – Значення \tilde{v}_0 , які використовувались в імітаційному експерименті

\tilde{v}_0 , м/год	2,7	3,9	4,5	7,3	9,9	Середнє значення ймовірності
Ймовірність	0,89	0,93	0,92	0,95	0,94	0,926

Розроблено структуру автоматизованої системи визначення буримості гірської породи.

Визначено вірогідність контролю буримості гірських порід $\beta = 1 - \frac{p_x^*}{p_x} = 0,92$,

де $p_x^* = 0,008$ – ймовірність помилкових рішень при використанні розробленого методу контролю буримості гірських порід; $p_x = 0,1$ – ймовірність помилкових рішень до застосування контролю буримості гірських порід, що визначена за даними підприємства при рівні значущості $\alpha = 0,1$.

Розглянуто питання практичної реалізації запропонованого методу ідентифікації буримості гірських порід в системі адаптивного оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин. Результати досліджень підтвердили адекватність математичної моделі механічної швидкості буріння та правильність вибору методу нейромережевого оброблення вимірювальної інформації, як такого, що володіє кращою чутливістю та меншою похибкою вимірювань у порівнянні з традиційними методами контролю.

Висновок

Аналіз отриманих результатів показав, що розроблений метод ідентифікації буримості гірських порід охоплює всі гірські породи – від м'яких до твердих. Розроблений рекурентний алгоритм кумулятивних сум для оброблення вимірювальної інформації про буримість гірських порід забезпечує розв'язок задачі визначення меж пластів, однорідних за буримістю. Ефективність і збіжність алгоритму підтверджена імітаційним моделюванням та результатами промислових досліджень, проведених на бурових Прикарпаття, що підтвердило доцільність застосування його в системі оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин.

Література

- 1 Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин / М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенов. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2003 – 493 с.
- 2 Семенов Г.Н. Автоматизація технологічних процесів у нафтовій і газовій промисловості / Г.Н.Семенов [та ін.]. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009 – 300 с.
- 3 Сабат Н.В. Ідентифікація буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд.техн.наук: спец.05.13.07 «Автоматизація процесів керування» / Н.В.Сабат. – Івано-Франківськ, 2011. – 20 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії

18.11.11

Рекомендована до друку професором
Г. Н. Семеновим